Картографирование наземного покрова заповедника «Кивач» и прилегающих территорий с использованием данных дистанционного зондирования

Б. В. Раевский ¹, В. В. Тарасенко ²

¹ Институт леса Карельского научного центра РАН Петрозаводск, 185000, Россия E-mail: borisraevsky@gmail.com

² Отдел комплексных научных исследований Карельского научного центра РАН Петрозаводск, 185000, Россия E-mail: victor.tarasenko.2208@mail.ru

Разработка цифровых векторных карт растительного покрова на основе дешифрирования данных дистанционного зондирования имеет исключительное значение с точки зрения организации мониторинга природной и антропогенной динамики лесных сообществ. На примере заповедника «Кивач» и окружающей его территории выполнен сравнительный анализ эффективности применения ряда алгоритмов контролируемой классификации, а именно: «минимальное расстояние», «дерево решений» и «случайный лес», реализованных в среде облачного сервиса GEE (англ. Google Earth Engine). Показано, что при классификации снимков спутника Sentinel-2 среди них лучшие результаты по показателям точности принадлежали алгоритму «дерево решений». Это позволило создать актуальную цифровую карту растительности исследуемой территории, по своей детализации близкую к такому ведомственному картографическому продукту, как план лесонасаждений (М 1:50 000). Верификация итогов дешифрирования разновременных снимков Landsat на основе лесоустроительной информации выявила, что в сравнении с другими использованными алгоритмами метод «минимального расстояния» оказался способен сформировать более достоверную модель динамики растительного покрова исследуемой территории. Дешифрирование разновременных данных дистанционного зондирования дало возможность отразить скрытый процесс увеличения доли ели в структуре массива производных лесов. Полученные данные свидетельствуют, что на современном возрастном этапе развития исследованных лесов сукцессионные процессы ведут к сокращению в их структуре площади насаждений с преобладанием лиственных пород.

Ключевые слова: многозональные космические снимки, Landsat, Sentinel-2, классификация с обучением, наземный покров, производные леса, данные дистанционного зондирования, дешифрирование

Одобрена к печати: 30.09.2024 DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-171-187

Введение

В настоящее время подавляющее большинство регионов РФ, в том числе Республика Карелия, не имеют актуальных карт растительного покрова обзорно-топографического уровня и крупнее, отражающих итоги и тенденции природной динамики и антропогенной трансформации растительного покрова. Цифровое тематическое картографирование выполнено для отдельных районов Карелии или крупных особо охраняемых территорий (Раевский, Тарасенко, 2019; Раевский и др., 2022). В силу описанной выше ситуации, планово-картографические материалы лесоустройства, созданные по сугубо ведомственным правилам, зачастую являются единственным источником пространственной информации в отношении растительного покрова большей части территории Карелии. Однако, к сожалению, во многих случаях они не очень актуальны, так как около 50 % лесного фонда РФ имеет давность лесоустройства более 30 лет (Zamolodchikov et al., 2020).

Таким образом, на текущий момент цифровое картографирование ключевых, наиболее интересных и репрезентативных в ландшафтном отношении территорий с использованием разновременных космических снимков (КС), однородных в радиометрическом и геометрическом

аспектах, по сути является единственным возможным способом исследования природной и антропогенной динамики наземного покрова той или иной исследуемой территории (ИТ).

Как отмечается в литературе (Барталев и др., 2016), современный этап в развитии технологий спутникового картографирования (с начала 2000-х гг.) характеризуется нарастающим уровнем открытости доступа к спутниковым данным, а также созданием веб-сервисов онлайн-предоставления информационных продуктов и инструментов их анализа.

Одним из таких сервисов служит платформа облачных вычислений GEE (англ. Google Earth Engine). Данная платформа предоставляет некоммерческим пользователям свободный доступ к огромному объёму КС, сделанных в процессе реализации множества спутниковых программ. Платформа позволяет легко сортировать и фильтровать данные дистанционного зондирования (ДДЗ) конкретного космического аппарата для различных пространственных и временных масштабов. Сервис GEE также предоставляет разные вычислительные алгоритмы контролируемой и неконтролируемой классификации, а также алгоритмы вычисления множества вегетационных индексов и т.п. Одним из главных преимуществ платформы GEE стал широкий набор данных, позволяющих проводить мониторинг изменений в состоянии наземного покрова.

Цель настоящего исследования заключалась в оценке современного состояния и выявления динамики растительного покрова среднетаёжных ландшафтов, представленных в границах заповедника «Кивач» и на окружающей его территории, не имеющей заповедного статуса, способом обработки разновременных многозональных КС среднего разрешения в среде GEE.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1. Разработка пространственной модели современного состояния наземного покрова ИТ и оценка её достоверности.
- 2. Выявление природной и антропогенной динамики изменений растительного покрова ИТ с использованием нормализованного индекса гарей NBR (англ. Normalized Burn Ratio).
- 3. Оценка структурных изменений лесного покрова ИТ как итога протекания природных сукцессионных процессов в лесных экосистемах.

Объекты и методы исследования

Наибольший интерес для исследования динамики таёжных массивов представляют такие участки таёжных ландшафтов, где крупные федеральные особо охраняемые природные территории со строгим режимом охраны, исключающим практически любую хозяйственную деятельность, окружены эксплуатационными лесами, претерпевшими все перипетии государственной политики лесопользования за последнее столетие. Поэтому в качестве объектов исследования была взята территория государственного заповедника «Кивач», занимающая площадь 10 880,4 га, и набор из 122 окружающих его кварталов Кондопожского лесничества общей площадью 25 907,6 га. Таким образом, общая площадь полигона ИТ составила порядка 36 788 га. Заповедник «Кивач» был организован в 1931 г. на площади 2000 га с целью охраны и восстановления эталонного участка среднетаёжной подзоны европейской части России. Название он получил от вдп. Кивач на р. Суна — одного из самых известных памятников природы Карелии. До 1947 г. большая часть его современной территории охранного статуса не имела. Геометрический центр этой территории находится в точке с координатами: 33,92188° в.д. и 62,29759° с.ш. (рис. 1, см. с. 173).

Исследуемая территория характеризуется рядом важных особенностей ландшафтного строения и истории лесопользования, знание которых необходимо для понимания наблюдаемых ныне тенденций динамики лесного покрова. Она расположена в юго-восточной части Балтийского кристаллического щита на северо-западном побережье Онежского озера и представлена денудационно-тектоническим грядовым (сельговым) среднезаболоченным ландшафтом с преобладанием сосновых местообитаний (Волков и др., 1990). Основные черты рельефа этого ландшафта сформировались в результате денудационно-тектонических про-

цессов, денудационной и аккумулятивной деятельности последнего Валдайского оледенения. Около 11 400 лет назад у края отступающего ледника образовался крупный и глубокий Онежский приледниковый водоём и на ИТ процессы ледниковой эрозии и аккумуляции сменились осаждением сезонно-слоистых ленточных глин. Около 10 700 лет назад край ледника отступил из водосборного бассейна Онежского озера в западной Карелии, талые воды прекратили поступать в водоём и поверх донных ленточных глин началось накопление гомогенных алевритов. В процессе перемещения рыхлых отложений волнами и течениями формировались плоские террасы и песчаные равнины. Окончательное освобождение территории от вод Онежского озера совершилось около 8000 лет назад (Демидов и др., 2006). В целом для заповедника описано пять типов местности, представленных на рис. 2 (см. с. 174) (Волков и др., 1990; Кутенков, 2018).

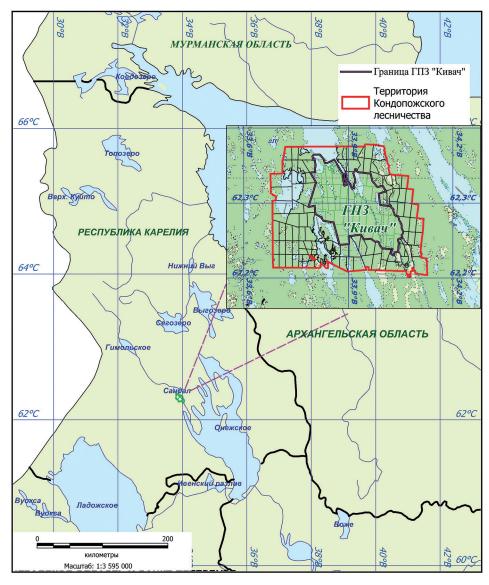
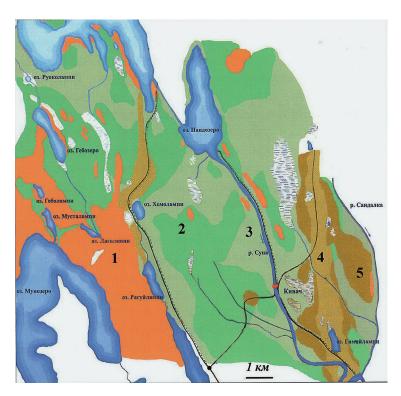


Рис. 1. Карта-схема расположения исследуемой территории

Исследуемый лесной массив длительное время являлся лесосырьевой базой Кончезерского металлургического завода, который был построен в начале XVIII в. и проработал с перерывами в течение 200 лет (Кутенков, 2000). За указанный период леса ИТ рубились всплошную преимущественно с целью изготовления древесного угля и были сведены практически полностью не менее двух раз, но при этом всякий раз успешно восстанавливались.



 $Puc.\ 2.$ Ландшафтные комплексы «Кивач». Типы местности: 1 — грядовый тип, 2 — всхолмленная моренная равнина, 3 — плосковогнутая моренная равнина с плащом озерно-ледниковых глин, 4 — гляцио-флювиальные системы, 5 — песчаные равнины на месте размытых озов

Все операции по поиску и обработке мультиспектральных ДДЗ осуществлялись с использованием облачного геосервиса GEE. Для разработки пространственной модели современного состояния наземного покрова ИТ были использованы снимки спутниковой программы Sentinel-2 уровня 2A из коллекции COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED. При выборе снимков учитывались требования сезонности (вегетационный период: май—сентябрь) и отсутствие облачности (в пределах от 0 до 5,0 %). По результатам анализа имеющихся в свободном доступе архивных данных были выбраны следующие КС, покрывающие территорию исследования:

- COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20190509T092031_20190509T092039_T36VWQ, дата съёмки 9 мая 2019 г., далее по тексту Sntnl_20190509;
- COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20200617T092029_20200617T092207_T36VWQ, дата съёмки 17 июня 2020 г., далее по тексту Sntnl_20200617.

Визуализация цветных RGB-композитов (англ. Red, Green, Blue — красный, зелёный, синий) и классификация фрагментов растров осуществлялись в комбинации каналов «6-8-12»: 6-й канал — Red Edge2 (20 м/пиксель); 8-й — NIR (англ. Near Infrared, 10 м/пиксель); 12-й — SWIR 2 (англ. Short Wavelength Infrared 2, 20 м/пиксель).

Классификация растров осуществлялась с использованием ряда алгоритмов управляемой классификации, реализованных в GEE, а именно:

- minimumDistance метод минимального (евклидова) расстояния MD (англ. Minimum Distance);
- smileCart метод дерева решений CART (англ. Classification and Regression Tree);
- smileRandomForest метод случайного леса RF (англ. Random Forest).

Смысл контролируемой (с обучением) классификации заключается в отнесении каждого из пикселей снимка к определённому классу объектов на местности, которому соответствует некоторая область в пространстве признаков.

Минимальное (евклидово) расстояние — это один из методов управляемой классификации, основанный на детерминированном подходе. Минимальное расстояние определяет спектральное расстояние между вектором пикселя и средним вектором для каждой сигнатуры. Пиксель относится к тому эталонному классу, евклидово расстояние до центра которого в пространстве признаков минимально (Şatır, Berberoğlu, 2012). Метод минимальных расстояний основан на евклидовой метрике и может рассматриваться безотносительно к нормальному закону распределения.

Дерево решений. Основная идея данного алгоритма машинного обучения заключается в построении бинарного дерева, в котором каждый внутренний узел представляет собой условие на признаках, а листья — конечный результат работы алгоритма (например, принадлежность к определённому классу). Суть алгоритма заключается в рекурсивном разделении выборки на две части по пороговому значению признака — объекты, у которых значение признака меньше или равно порогу, и объекты, у которых значение признака больше порога. Для каждой из двух полученных подвыборок указанные шаги выполняются, пока не будет достигнут критерий остановки, например, глубина дерева (Али и др., 2020; Loh, 2011).

Метод случайного леса — алгоритм машинного обучения, предложенный Лео Брейманом и Адель Катлер (Breiman, 2001). Метод является расширением алгоритма решающих деревьев, который использует ансамбль деревьев для улучшения качества классификации или регрессии. Суть алгоритма заключается в том, что он создаёт множество решающих деревьев и использует их для предсказания классов объектов. Каждое дерево строится на случайном подмножестве обучающих данных и случайном подмножестве признаков. В результате каждое дерево в ансамбле получается немного разным, что позволяет уменьшить эффект переобучения и повысить качество предсказаний.

Достоверность полученной пространственной модели определялась использованием метода матрицы неточностей (англ. confusion matrix) и расчётом комплекса связанных с ней параметров: коэффициента Каппа, точности пользователя и точности производителя (Курбанов, Воробьев, 2020; Малышева, 2012).

Оценка природных и антропогенных изменений в растительном покрове ИТ осуществлялась вычислением разностных величин нормализованного индекса гарей NBR за последние три десятилетия с использованием временной серии снимков спутника Landsat (Landsat-5 и -8). Для увеличения достоверности получаемой пространственной модели общий временной период с 1996 по 2023 г. был разбит на восемь неравных периодов путём эмпирического подбора лучших изображений, отобранных по критериям сезонности и облачности. Индекс гарей (Alcaras et al., 2022) рассчитывался как разность спектрального отражения в ближнем (NIR) и 2-м коротковолновом (SWIR) инфракрасных каналах, нормализованная на их сумму: NBR = (NIR – SWIR)/(NIR + SWIR).

Оценка структурных изменений в заповедном лесном массиве в границах особо охраняемых природных территорий и остальной части лесов ИТ осуществлялась сравнительным анализом результатов дешифрирования разновременных снимков программы Landsat. По результатам анализа из коллекций LANDSAT/LT05/C02/T1_L2 и LANDSAT/LC08/C02/T1_L2 были выбраны следующие КС, покрывающие территорию исследования:

- LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/LT05_183016_20060614, дата съёмки 14 июня 2006 г., далее по тексту Lndst 20060614;
- LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_183017_20190517, дата съёмки 17 мая 2019 г., далее по тексту Lndst 20190517.

Визуализация цветных RGB-композит и классификация фрагментов растров осуществлялась вышеупомянутыми методами управляемой классификации в комбинации каналов «5-4-3»: 3-й канал — Red; 4-й — NIR; 5-й — SWIR1 для Landsat-5, и комбинации «6-5-4»: 6-й канал — SWIR1; 5-й — NIR; 4-й — Red для Landsat-8. Пространственное разрешение — 30 м/пиксель.

Как уже отмечалось выше, достоверность полученных пространственных моделей осуществлялась путём использования метода матрицы неточностей и расчёта комплекса связанных

с ней параметров. Позиционная и тематическая точность всех полученных пространственных моделей также оценивалась с использованием атрибутивных и картографических материалов последнего лесоустройства (2005) и материалов государственного лесного реестра (ГЛР) по состоянию на 01.01.2024.

Результаты и обсуждение

Первый шаг процедуры классификации заключается в формировании классификатора, представляющего собой объединённую выборку эталонных участков, являющихся характерными (типичными) представителями выделяемых классов. Этап обучения фактически состоит в расчёте и анализе некоторого набора статистических характеристик (сигнатур) пикселей, определяющих все выбранные типы поверхности (Шовенгердт, 2013).

Для разработки классификатора использовались план лесонасаждений заповедника «Кивач», а также планы Берёзовского, Нелгомозерского, Юркостровского и Спасогубского участковых лесничеств Кондопожского лесничества, раскрашенные по преобладающим породам, таксационные описания выделов и мозаика КС высокого разрешения, доступная на картографическом сервисе Bing Maps (*табл. 1*).

№ п/п	Имя класса	Номер класса	Число эталонов, шт.	Общая площадь, га
1	Населённые пункты	0	13	10,7
2	Поля	1	23	36,5
3	Болота1	2	21	13,0
4	Болота2	3	22	11,8
5	Болота3	4	20	7,9
6	Вырубки старые	5	7	17,6
7	Вырубки свежие	6	30	27,1
8	Дороги	7	13	1,2
9	Водные объекты	8	32	277,7
10	Сосняки черничные	9	68	36,6
11	Сосняки влажные	10	66	23,7
12	Сосново-еловые леса	11	53	30,0
13	Сосново-берёзовые леса	12	16	6,9
14	Осинники	13	37	7,7
15	Ельники	14	61	35,3
16	Елово-сосновые леса	15	32	21,7
17	Елово-берёзовые леса	16	19	8,7
18	Березняки	17	67	22,8
19	Берёзово-сосновые леса	18	7	1,4
20	Берёзово-еловые леса	19	14	5,5
21	Сосняки брусничные	20	30	12,9
Итого			651	616,6

Таблица 1. Характеристика набора эталонов обучающей выборки

В среде MapInfo v.17.03 был сформирован слой полигональных объектов (эталонов), характеризующих 21 тематический класс, и загружен в GEE как пространственный набор данных (shape-формат). Общая численность выборки составила 651 полигон (616,6 га), при средней площади полигона, равной 0,95 га. При классификации вся выборка эталонов про-

граммно разбивалась случайным образом в соотношении 70-30% на собственно обучающую (*англ*. training) и валидационную (*англ*. validation) выборки.

Для разработки пространственной модели современного состояния наземного покрова ИТ были использованы снимки спутниковой программы Sentinel-2. Дешифрирование изображений и создание тематических карт осуществлялись на основе результатов, полученных с использованием трёх алгоритмов управляемой классификации. Итоги оценки достоверности (точности) построенных пространственных моделей представлены в *табл. 2* и *3*.

Таблица 2. Показатели общей точности результатов классификации снимков Sentinel-2

Алгоритм	Sntnl_	20190509	Sntnl_20200617			
классификации	Общая точность, %	Коэффициент Каппа	Общая точность, %	Коэффициент Каппа		
1. CART	88,6	0,85	93,1	0,91		
2. RF	86,6	0,82	89,8	0,87		
3. MD	76,0	0,69	74,2	0,66		
Среднее	83,7	0,79	85,7	0,81		

Таблица 3. Показатели точности производителя (в %) результатов классификации снимков Sentinel-2

Алгоритм	Среднее по всем	Группы классов					
классификации	классам	Нелесные и не покрытые лесом земли (0-7)	Покрытые лесом земли (9-20)				
		Sntnl_20190509					
1. CART	ART 76,6 85,1		69,0				
2. RF	69,0	82,2	57,7				
3. MD	51,4	66,5	37,2				
Sntnl_20200617							
1. CART 84,8		84,8	83,6				
2. RF	74,0	72,9	74,6				
3. MD	33,6	46,5	44,2				

Достоверность управляемой (контролируемой) классификации оценивается через построение так называемой «матрицы ошибок» (Курбанов, Воробьев, 2020), или «матрицы неточностей» (Малышева, 2012). Общая достоверность классификации (англ. overall accuracy) определялась как частное от деления числа правильно классифицированных пикселей на общее число всех пикселей во всех контрольных эталонах (см. табл. 2). Кроме этого, рассчитывался ряд важнейших формальных показателей, характеризующих достоверность классификации. Например, точность производителя (англ. producer's accuracy) — доля правильно классифицированных пикселей по отношению к общему числу пикселей, классифицированных как принадлежащих данному классу в контрольных эталонах всех классов (см. табл. 3). В данной таблице также представлены средние показатели точности производителя по группам классов без учёта величины точности по классу водных объектов. Для подтверждения того, что показатель достоверности не является случайным, использован так называемый коэффициент Каппа. Данный коэффициент является критерием согласованности данных классификации, т.е. оценивает, насколько хорошо выполняется классификация изображения по сравнению с просто случайным присвоением значений (см. табл. 2).

Анализ данных, приведённых в *табл. 2* и *3*, позволяет заключить, что при классификации снимков Sentinel-2 алгоритм CART показал самые высокие параметры достоверности (точности). При этом точность классификации раннелетнего изображения (Sntnl_20200617) оказалась выше за счёт более успешной классификации насаждений с преобладанием

берёзы и осины в фенологической фазе их полного облиствения. Ранневесенний снимок (Sntnl_20190509) был сделан в период начала фенофазы появления листьев на берёзе и при полном их отсутствии на осине. Общий визуальный анализ тематической карты ИТ, представленной на рис. 3, свидетельствует, что в границах заповедника существует практически нерасчленённый элементами антропогенной инфраструктуры лесной массив с характерным для таёжных лесов преобладанием хвойных насаждений, окружённый в значительной степени антропогенно трансформированными ландшафтами с преобладанием лиственных пород.

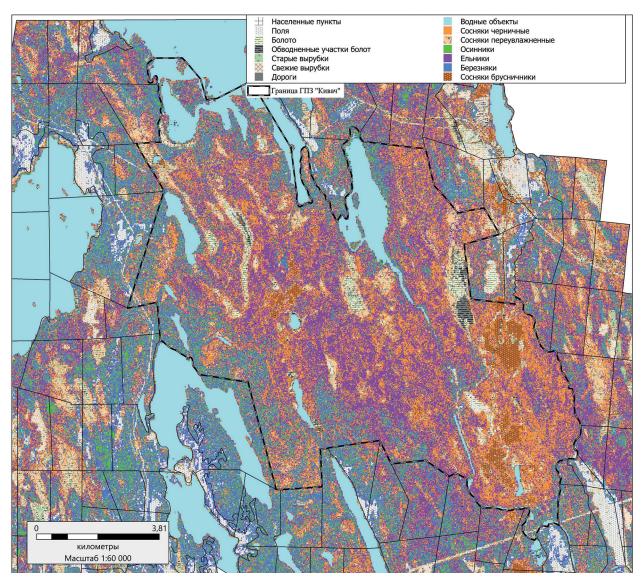


Рис. 3. Тематическая карта исследуемой территории, построенная по результатам классификации Sntnl_20200617 методом CART

Следует отметить, что для достижения большего сходства с планом лесонасаждений и облегчения визуального восприятия тематические карты на *рис*. *3* и *5* раскрашены в оттенках, традиционно принятых в лесном хозяйстве. При этом классы с преобладанием берёзы (№ 18−20) и ели (№ 15−17) как составляющих пород объединены в соответствующие группы (березняки и ельники), поскольку в типологическом отношении они в высокой степени однородны. У ели абсолютно преобладает черничный тип леса (69,0 %), а у берёзы — черничный и разнотравный типы (77,5 %). У сосны также по причине типологического сходства были тематически объединены сосняки черничные, сосново-еловые и сосново-берё-

зовые древостои (№ 10, 12, 13). Отдельно показаны переувлажнённые типы леса — сосняки осоко-сфагновые, багульниковые и сфагновые (№ 11), а также сосняки брусничные (№ 21). Различные типы болот также были тематически объединены (№ 3, 4) с выделением сильно обводнённых участков болотных массивов (№ 5).

В *табл. 4* представлены данные, характеризующие площадную структуру покрытой лесом площади ИТ по итогам дешифрирования и по данным государственного лесного реестра. Анализируя указанную таблицу, следует отметить существенную разницу по результатам реализации различных алгоритмов управляемой классификации. Ранее определённый лучшим по показателям точности алгоритм CART демонстрирует увеличение площади, занимаемой хвойными видами (преимущественно елью), и сокращение этого показателя у лиственных пород.

Таблица 4. Площадная структура исследуемой территории по результатам дешифрирования

Группы классов	Площадь,	га	Разница			
	Дешифрирование	ГЛР	Абсолютная, га	Относительная, %	Относительная, по модулю	
		(CART			
Сосняки	9727,7	9717,3	10,4	0,1	0,1	
Ельники	8236,3	6931,1	1305,2	18,8	18,8	
Березняки	6899,7	7878,2	-978,5	-12,4	12,4	
Осинники	2601,5	1899,0	702,5	37,0	37,0	
Сумма				43,5	68,4	
Итого хвойные	17964,0	16648,4	1315,6	7,9	7,9	
Итого лиственные	9501,2	9777,2	-276,0	-2,8	2,8	
Сумма				5,1	10,7	
			RF			
Сосняки	11235,9	9717,3	1518,6	15,6	15,6	
Ельники	6838,4	6931,1	-92,7	-1,3	1,3	
Березняки	8080,7	7878,2	202,5	2,6	2,6	
Осинники	1796,5	1899,0	-102,5	-5,4	5,4	
Сумма				11,5	24,9	
Итого хвойные	18074,3	16648,4	1425,9	8,6	8,6	
Итого лиственные	9877,2	9777,2	100,0	1,0	1,0	
Сумма				9,6	9,6	
			MD			
Сосняки	9401,1	9717,3	-316,2	-3,3	3,3	
Ельники	7349,2	6931,1	418,1	6,0	6,0	
Березняки	8441,3	7878,2	563,1	7,1	7,1	
Осинники	2921,7	1899,0	1022,7	53,9	53,9	
Сумма				63,8	70,3	
Итого хвойные	16750,3	16648,4	101,9	0,6	0,6	
Итого лиственные	11363,0	9777,2	1585,8	16,2	16,2	
Сумма				16,8	16,8	

В *табл. 5* и на *рис. 4* (см. с. 180) даны площадные оценки природных и антропогенных нарушений в растительном покрове ИТ, полученные вычислением и тематическим картированием разностных величин индекса NBR за последние 27 лет.

Таблица 5. Динамика площадей растительного покрова, где были отмечены изменения

Годы	Восстановление, га	Нарушение, га
1996-2006	136,5	168,8
2006-2009	195,6	20,0
2009-2011	12,5	22,8
2011-2013	10,7	133,2
2013-2016	10,3	88,5
2016-2018	262,0	58,8
2018-2019	3,3	87,2
2019-2023	181,7	83,9
Итого	812,7	663,4

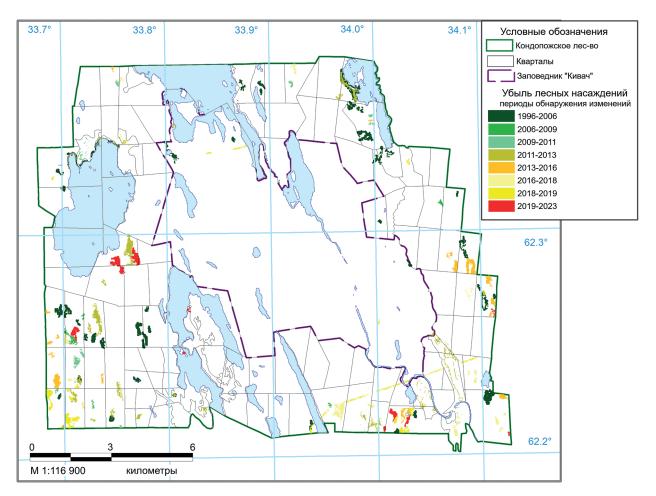


Рис. 4. Тематическая карта динамики нарушений растительного покрова

Анализ полученных данных позволил выявить следующие закономерности. Обнаруженные нарушения растительного покрова связаны преимущественно с рубками в эксплуатационных лесах Кондопожского лесничества, а его восстановление определяется лесовосстановительными процессами на вырубках и зарастанием земель сельскохозяйственного пользования. Площади, где были отмечены взаимно направленные изменения состояния растительного покрова, оказались довольно близки, а их доля составила не более 2,2% от всей ИТ. Практически все изменения происходили вне границ заповедника. В ходе лесоустройства 2005 г. на территории заповедника были отмечены 20,5 га погибших в результате повышения уровня грунтовых вод еловых и берёзовых насаждений. Также тематическая карта

показывает результаты удаления лиственной растительности с сильно заросших трасс ЛЭП, проходящих через территорию заповедника. Таким образом, фактов масштабной катастрофической лесной динамики на ИТ за последние три десятилетия выявлено не было.

Анализ структуры и таксационных параметров древостоев был выполнен на основе статистического анализа повыдельной базы данных последнего лесоустройства (*табл. 6*). Для этого на территории заповедника в границах типов местности № 4 и 5, а также 2 и 3 были отобраны по восемь кварталов. Дополнительно в заповеднике были выбраны восемь кварталов с максимальной долей берёзовых насаждений. В анализируемом массиве выделов местностей № 4 и 5 (1166,6 га) преобладали сосняки (78,0%), а в их составе — насаждения черничного типа (59,3 %) 8-го и 9-го классов возраста (85,5 %). В выборке выделов для местностей № 2 и 3 (1549,9 га) доли сосняков и ельников составили 40,6 и 43,4 % соответственно, с преобладанием того же типа леса (71,4 и 74,0 %) и классов возраста (70,8 и 76,0 %). В выборке выделов, характеризующих березняки заповедника (1793,4 га), их доля по площади достигала 35,2 %с преобладанием насаждений черничного и травяно-злакового типов (88,5 %) 8-го, 9-го и 10-го классов возраста (74,0%). Для сравнительного анализа с заповедной территорией был взят массив из восьми кварталов Берёзовского участкового лесничества. В выборке выделов Берёзовского участкового лесничества (1544,9 га) распределение по преобладающим породам было следующим: сосняки — 16.2%; ельники — 22.6%, березняки — 49.3%, осинники — 11,9 %. Для лесничества анализировались выборки выделов по преобладающим породам того же типа леса, что и для заповедника. Анализ данных табл. 6 позволяет сделать ряд важных обобщений, характеризующих леса ИТ, и направление сукцессионных процессов в них.

Хронологически последнее массовое восстановление лесов заповедника началось в 30-40-х гг. XIX столетия, при этом естественное возобновление сосны обыкновенной повсеместно было пионерным и вполне успешным. С течением времени ель в условиях моренных равнин (местности № 2 и 3) сумела захватить и продолжает успешно удерживать сравнительно плодородные и наиболее подходящие для неё в почвенно-гидрологическом отношении площади. Ель присутствует в составе большей части сосняков черничных (76,1%) в местностях № 4 и 5, а на моренных равнинах практически все сосняки черничные (98,5 %) имеют в своей структуре около 20 % ели. На современном этапе в ельниках идёт активное внедрение второго елового поколения в основной полог. В целом хвойные леса заповедника, по меркам среднетаёжной подзоны, могут быть охарактеризованы как высокопродуктивные. Причём благодаря двучленному строению озёрно-ледниковых отложений и хорошему дренажу сосняки черничные в местностях № 4 и 5 совершенно не уступают по своей продуктивности менее дренированным соснякам, произрастающим на моренной равнине (местности № 2 и 3). Березняки заповедника представляют собой последствия сплошных рубок 30-х гг. ХХ столетия и попали в его состав, по всей видимости, при расширении территории заповедника в 1947 г. Обращает на себя внимание высокая доля участия осины в березняках. Ель там тоже, конечно, присутствует и как составляющая порода, и в качестве крупномерного подроста. Хвойные леса Берёзовского участкового лесничества существенно моложе лесов заповедника. Они активно эксплуатировались в 20-х гг. ХХ столетия. Ельники сформировались из сохранённого подроста ели предварительного возобновления. Березняки возникли на месте сплошных рубок 1930-х гг. В качестве гипотетического прогноза дальнейшей судьбы и хода сукцессионных процессов в лесах ИТ необходимо отметить следующее. Эксплуатационные леса Берёзовского участкового лесничества достигли возраста спелости и, по всей видимости, хвойные древостои будут в ближайшей перспективе активно рубиться. Лиственные (берёзовые) леса достигли возрастного рубежа, когда ель активно выходит в первый ярус и процесс смены главной породы достигает своей кульминации. В лесах заповедника при отсутствии выраженной катастрофической (пожарной, ветровальной) динамики участие ели в структуре хвойных древостоев будет увеличиваться. Причём это касается не только сосняков, но и ельников. Доля участия сосны в последних будет уменьшаться на фоне формирования относительно разновозрастных чистых ельников с участием не менее трёх поколений ели. В березняках также будет происходить смена главной породы с превращением их в елово-осиновоберёзовые древостои.

Таблица 6. Средние таксационные параметры древостоев исследуемой территории

Тип местности	Преобладающая порода		Класс Относительная возраста полнота	Класс бонитета	Структура древостоя	Возраст, лет	Высота, м	Возраст, Высота, м Диаметр, см	Запас 1 га, м ³	Запас 1 га, м ³	Доля в составе, %
					Заповедник «Кивач»						
4_5	Сосна	6	0,74	11,8	10C	163	24,8	32	298	110,4	23,9
4_5	Сосна	6	0,75	11,7	$7C_{166} 1,9E_{142} 1,1E_{90}$	991	25,6	33	316	351,1	76,1
2_3	Сосна	8	0,75	111,0	10C	150	24,5	29	297	4,7	1,5
2_3	Сосна	6	0,73	111,0	$5.3C_{161} 2E_{157} 1.8E_{90} 0.90c_{80}$	161	25,0	31	286	313,5	98,5
2_3	Ель	6	0,70	1II,0	$5,1E_{162}$ $1,6C_{173}$ $0,6E_{92}$ $1,3E_{90}$ $1,2Oc_{90}$	162	25,1	29	300	368,3	100
-	Берёза	6	0,77	11,0	$4,6E_{87}$ $3Oc_{82}$ $1,6C_{146}$ $0,8E_{120}$	87	23,9	23	239	412,4	100
				7	Берёзовское участковое лесничество	нество					
ı	Сосна	5	0,70	111,0	10C	85	20,0	26	211 9,5	9,5	6,4
I	Сосна	5	0,80	11,8	$6.3C_{88} 1.3E_{58} 1.4B_{62} 1.0Oc_{59}$	88	20,6	25	251	138,0	93,6
_	Ель	9	0,73	111,3	$4,8E_{110}\ 0,7C_{124}\ 0,7E_{84}\ 2,3B_{70} \\ 1,5Oc_{59}$	110	20,9	24	257	211,2	100
_	E epësa	7	1,00	III,0	10Б	65	17,0	16	178	6,0	1,3
I	Берёза	8	0,86	П,2	$5,3E_{74}2,50c_{63}1,2E_{39}0,8C_{49}$ $0,2O_{146}$	74	20,3	21	209	466,6	98,7

значением породы указывает её долю участия по запасу на 1 га. Числовой индекс после обозначения породы — возраст элемента леса в годах. Возраст и другие таксационные параметры рассчитаны на год ольха. Число перед оболесоустройства (2005). Средняя высота и диаметр даны по преобладающему элементу леса. Примечание: С — сосна, Е — ель, Б — берёза; Ос

20.8

Оценивая высказанные гипотетические предположения, следует отметить, что лесоустройство в заповеднике осуществлялось пять раз (в 1926, 1928, 1940, 1977 и 2005). Материалы первых трёх инвентаризаций не сохранились. По данным 1977 и 2005 гг. (*табл. 7*), площадная структура покрытых лесом земель заповедника за 28-летний период практически не изменилась. В этом аспекте результаты дешифрирования снимка Sentinel-2 за 2020 г. методом минимального расстояния (MD) оказались ближе всего к лесоустроительным данным (см. *табл. 7*).

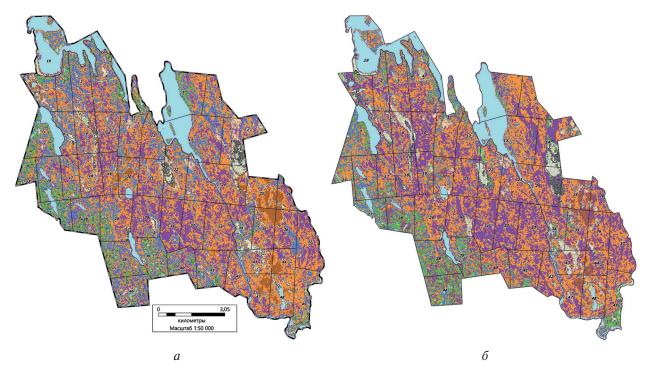
	ройство	Дешифрирование Sntnl 20200617				
1977 г.	2005 г.	MD	RF	CART		
45,4	44,5	44,7	49,4	42,3		
32,8	31,9	34,5	33,8	39,6		
78,2	76,4	79,2	83,2	81,8		
16,2	16,7	14,3	12,4	12,4		
5,6	6,9	6,5	4,4	5,7		
	45,4 32,8 78,2 16,2	45,4 44,5 32,8 31,9 78,2 76,4 16,2 16,7	45,4 44,5 44,7 32,8 31,9 34,5 78,2 76,4 79,2 16,2 16,7 14,3	45,4 44,5 44,7 49,4 32,8 31,9 34,5 33,8 78,2 76,4 79,2 83,2 16,2 16,7 14,3 12,4		

23,6

21,8

Итого лиственные

Таблица 7. Соотношение площадей (га) заповедника «Кивач» по преобладающим породам (в %)



Puc. 5. Тематические карты заповедника «Кивач», построенные по результатам классификации снимков Landsat методом MD: a- Lndst_20060614; $\delta-$ Lndst_20190517

Поскольку именно программа Landsat предоставляет наилучшие возможности для ретроспективного мониторинга, вышеописанными алгоритмами была осуществлена классификация снимков 2006 и 2019 гг. В результате только дешифрирование на базе классификации алгоритмом MD позволило получить количественные оценки, согласующиеся с высказанной выше гипотезой о направлении сукцессионных процессов и динамике структурных изменений в лесном массиве ИТ (см. рис. 5, табл. 8).

Данные, представленные в *табл. 8*, позволяют оценить происходившие за истекшие 13 лет изменения следующим образом. На территории заповедника увеличение интенсивности

18,2

16,8

спектрального отражения ели в итоге оценивается таким образом, что занимаемая ею площадь увеличилась на 981,1 га при сокращении площади лиственных и сосновых насаждений на 1010,5 га. Невязка в балансе указанных площадей составляет 29,3 га или 0,33 % от дешифрированной покрытой лесом площади. Вне границ заповедника, несмотря на несколько отличные породно-возрастные структурные характеристики лесного массива, имеют место, в общем-то, схожие сукцессионные процессы. Отмечен рост площади сосняков, что, по всей видимости, является результатом мероприятий по искусственному возобновлению. Невязка в балансе «прибыли-убыли» площадей еловых и лиственных насаждений составила 119,8 га или 0,7 % от покрытой лесом площади.

Таблица 8. Динамика структуры покрытых лесом земель заповедника «Кивач» по преобладающим породам

Группы классов	Лесоустройст	тво 2005 г.	Lndst_20060614		Lndst_20190517		Разность за 2019—
	га	%	га	%	га	%	2006 гг., га
		3ano	ведник «Ки	вач»			
Сосняки	4118,9	44,5	3998,6	44,6	3870,7	43,3	-127,9
Ельники	2959,7	31,9	2398,9	26,8	3380,0	37,8	981,1
Березняки	1549,7	16,7	1936,0	21,6	1138,4	12,7	-797,6
Осинники	636,7	6,9	626,0	7,0	541,0	6,1	-85,0
Итого хвойные	7078,6	76,4	6397,4	71,4	7250,7	81,2	853,2
Итого лиственные	2186,4	23,6	2562,0	28,6	1679,4	18,8	-882,6
		Кондопа	экское лесн	ичество			
Сосняки	5155,4	30,8	5832,1	35,7	6499,4	37,9	667,3
Ельники	3971,4	23,8	2180,2	13,3	3570,0	20,8	1389,8
Березняки	6328,5	37,9	5457,9	33,4	4633,9	27,0	-823,9
Осинники	1262,3	7,6	2885,1	17,6	2439,1	14,2	-446,0
Итого хвойные	9126,8	54,6	8012,3	49,0	10069,4	58,7	2057,1
Итого лиственные	7590,8	45,4	8343,0	51,0	7073,1	41,3	-1269,9

Заключение

В настоящей статье рассмотрена достаточно типичная ситуация, когда существующая в России система учёта лесов не в состоянии обеспечить наличие актуальных пространственно привязанных материалов, характеризующих текущее состояние лесных экосистем и тенденции сукцессионных процессов в них протекающих. В этом случае спутниковое тематическое картографирование на основе дешифрирования ДДЗ среднего разрешения, фактически находящихся в свободном доступе, представляет собой оптимальный путь решения указанной проблемы. Очевидно также, что в ближайшей перспективе обработка мультиспектральных ДДЗ с использованием облачных геосервисов, таких как GEE, получит самое широкое применение в мониторинге наземного (растительного) покрова. Использование алгоритмов контролируемой классификации, и в частности такого как «дерево решений», позволило создать пространственную модель наземного покрова, характеризующуюся высокими показателями достоверности. Однако в отношении лесной растительности результаты, достигнутые с помощью алгоритма «минимальное расстояние», в наилучшей степени соответствовали имеющимся данным лесоустройства по сравнению с другими применёнными алгоритмами.

Проведённые исследования показали, что представленный на ИТ массив производных среднетаёжных лесов находится на таком возрастном этапе, когда в его структуре доля площадей, занимаемых лиственными породами, начинает сокращаться. В отсутствие масштабных явлений природной и антропогенной катастрофической динамики (массиро-

ванные рубки, пожары и ветровалы) доля участия ели в составе древостоев увеличивается. Дешифрирование разновременных ДДЗ зафиксировало увеличение интенсивности спектрального отражения еловых элементов леса и тем самым позволило отразить этот растянутый во времени и малозаметный процесс.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания Института леса Карельского НЦ РАН и в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учёта данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

Литература

- 1. *Али М. С.*, *Воробьёв О. Н.*, *Курбанов Э. А.* Алгоритм «дерево решений» для классификации лесов Сирийской Арабской Республики по снимку Sentinel-2 // Вестн. Поволжского гос. техн. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2020. № 1(45). С. 5—30. DOI: 10.25686/2306-2827.2020.1.5.
- 2. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- 3. Волков А.Д., Громцев А.Н., Еруков Г.В., Караваев В.Н., Коломыцев В.А., Курхинен Ю.П., Лак Г.Ц., Пыжин А.Ф., Сазонов С.В., Шелехов А.М. Экосистемы ландшафтов запада средней тайги (структура, динамика). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1990. 284 с.
- 4. *Демидов И. Н.*, *Лукашов А. Д.*, *Ильин В. А.* Рельеф заповедника «Кивач» и история геологического развития северо-западного Прионежья в четвертичном периоде // Тр. Карельского науч. центра РАН. 2006. № 10. С. 22—33.
- 5. *Курбанов Э. А., Воробьев О. Н.* Дистанционные методы в лесном хозяйстве: учеб. пособие. Йошкар-Ола: Поволжский гос. техн. ун-т, 2020. 268 с.
- 6. Куменков А. П. Водопад Кивач: справ. Петрозаводск: Форевер, 2018. 80 с.
- 7. *Кутенков А. П.* Заповедник «Кивач»: уникальность сочетания типичного // Природное и историко-культурное наследие северо-запада России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. Вып. 1. С. 20–33.
- 8. *Малышева Н.В.* Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений: метод. пособие. М.: Изд-во МГУЛ, 2012. 154 с.
- 9. *Раевский Б. В.*, *Тарасенко В. В.* Изучение динамики лесных массивов карельской части Зеленого пояса Фенноскандии методами дистанционного зондирования // Тр. Карельского науч. центра PAH. 2019. № 4. С. 89—99. DOI: 10.17076/them1023.
- 10. *Раевский Б. В.*, *Тарасенко В. В.*, *Петров Н. В.* Оценка современного состояния растительных сообществ заповедника «Костомукшский» по спутниковым снимкам системы Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 47—61. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-47-61.
- 11. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2013. 592 с.
- 12. *Alcaras E.*, *Costantino D.*, *Guastaferro F. et al.* Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): A new index for Sentinel-2 imagery // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 7. Article 1727. https://doi.org/10.3390/rs14071727.
- 13. *Breiman L.* Random forests // Machine Learning. 2001. V. 45. Iss. 1. P. 5–32. DOI 10.1023/A:1010933404324.
- 14. *Şatır O.*, *Berberoğlu S.* Land use/cover classification techniques using optical remotely sensed data in land-scape planning // Landscape Planning / ed. M. Ozyavuz. 2012. P. 21–54. https://cdn.intechopen.com/pdfs/37553.
- 15. *Loh W. Y.* Classification and regression trees // Wiley interdisciplinary reviews: data mining and knowledge discovery. 2011. V. 1, Iss. 1. P. 14–23. https://doi.org/10.1002/widm.8.
- 16. Zamolodchikov D., Shvidenko A., Bartalev S., Kulikova E., Held A., Valentini R., Lindner M. State of Russian forests and forestry // Russian Forests and Climate Change. What Science Can Tell Us. European Forest Institute, 2020. P. 17–44.

Land cover mapping of Kivach Strict Nature Reserve and its surroundings based on remotely sensed data

B. V. Raevsky¹, V. V. Tarasenko²

¹ Forest Research Institute of Karelian Research Centre RAS
Petrozavodsk 185000, Russia
E-mail: borisraevsky@gmail.com

² Department for Multidisciplinary Research of Karelian Research Centre RAS
Petrozavodsk 185000, Russia
E-mail: victor.tarasenko.2208@mail.ru

Digital vector mapping of land cover based on interpretation of remotely sensed data is of great importance for monitoring natural and anthropogenic dynamics in forest ecosystems. A comparative analysis of the efficiency of using supervised classifiers, such as Minimal Distance (MD), Classification and Regression Trees (CART), and Random Forest (RF), built into the cloud-based planetary scale platform GEE (Google Earth Engine), was performed in application to Kivach Strict Nature Reserve (SNR) and its surroundings. It is shown that in the case of Sentinel-2 images, the CART classifier provided the best assessment accuracy. This has enabled creating a renewable digital map of SNR ecosystems, which is roughly equivalent to a 1:50 000 forest stand map. The final results of Landsat space images interpretation were verified using forest survey data, revealing that MD procedure was capable of producing the most adequate spatial model of the investigated vegetation cover. Interpretation of a time series of remote sensing data revealed a latent process of spruce augmenting its share in the canopy, which commonly takes place in secondary forests of this kind. The data obtained provide evidence that in the current age stage, succession processes in these forests trend towards a decrease in the spatial share of deciduous stands in the forest structure.

Keywords: multispectral space images, Landsat, Sentinel-2, supervised classification, land cover, secondary forests, remote sensing data, interpretation

Accepted: 30.09.2024 DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-171-187

References

- 1. Ali M. S., Vorobev O. N., Kurbanov E. A., Decision tree algorithm for forest classification of Syrian Arab Republic with the use of Sentinel-2 Image, *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest Ecology. Nature Management*, 2020, No. 1(45), pp. 5–30 (in Russian), DOI: 10.25686/2306-2827.2020.1.5.
- 2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V., *Sputnikovoe katrographirovanie rastitelnogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAS, 2016, 208 p. (in Russian).
- 3. Volkov A. D., Gromtsev A. N., Erukov G. V., Karavaev V. N., Kolomytsev V. A., Kurkhinen Y. P., Lak G. T., Pyzhin A. F., Sazonov S. V., Shelekhov A. M., *Ecosystemy landshaftov zapada srednei tajgi (structura, dinamica)* (Landscape ecosystems of west middle taiga (structure and dynamics)), Petrozavodsk: KarNC RAC, 1990, 284 p. (in Russian).
- 4. Demidov I. N., Lukashov A. D., Iljin V. A., Strict Nature Reserve Kivach relief and the history of northwestern part Ladoga shore zone in Quaternary period, *Trudy Karelskogo nauchnogo centra RAN*, 2006, No. 10, pp. 22–33 (in Russian).
- 5. Kurbanov E.A., Vorobiev O.N., *Distantsionnye metody v lesnom khozyaistve* (Remote methods in forestry), Yoshkar-Ola: Volga State Technological Univ., 2020, 266 p. (in Russian).
- 6. Kutenkov A. P. *Vodopad Kivach: spravochnik* (Waterfall Kivach: guidebook), Petrozavodsk: Forever, 2018, 80 p. (in Russian).
- 7. Kutenkov A. P., Strict Nature reserve "Kivach": uniqueness of ubiquitarians structures, In: *Prirodnoe i istorico-culturnoe nasledie severo-zapada Rossii*, Petrozavodsk: KarRC, 2000, Iss. 1, pp. 20–33 (in Russian).
- 8. Malysheva N.V., *Avtomatizirovannoe deshifrirovanie aerokosmiteskikh izobrazhenii lesnykh nasazhdenii: metodicheskoe posobie* (Automatic interpretation of forests' remote sensing data: methodical guide), Moscow: Izd. MGUL, 2012, 154 p. (in Russian).

- 9. Raevsky B. V., Tarasenko V. V., Investigation of the dynamics of forests in the Karelian part of the Green Belt of Fennoscandia by remote sensing, *Trudy Karelskogo nauchnogo centra RAN*, 2019, No. 4, pp. 89–99 (in Russian), DOI: 10.17076/them1023.
- 10. Raevsky B. V., Tarasenko V. V., Petrov N. V., Inventory of the Kostomukshskiy Strict Nature Reserve vegetation using Landsat images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 47–61 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-47-61.
- 11. Schowengerdt R.A., *Distantsionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazhenii* (Remote sensing. Models and methods for image processing), Moscow: Technosphere, 2013, 592 p. (in Russian).
- 12. Alcaras E., Costantino D., Guastaferro F. et al., Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): A new index for Sentinel-2 imagery, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 7, Article 1727, https://doi.org/10.3390/rs14071727.
- 13. Breiman L., Random forests, *Machine Learning*, 2001, Vol. 45, Iss. 1, pp. 5–32, DOI: 10.1023/A:1010933404324.
- 14. Şatır O., Berberoğlu S., *Land use/cover classification techniques using optical remotely sensed data in land-scape planning*, In: Landscape Planning, Dr. Murat Ozyavuz (ed.), 2012, pp. 21–54, https://cdn.intechopen.com/pdfs/37553.
- 15. Loh W. Y., Classification and regression trees, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 2011, Vol. 1, Iss. 1, pp. 14–23, https://doi.org/10.1002/widm.8.
- 16. Zamolodchikov D., Shvidenko A., Bartalev S., Kulikova E., Held A., Valentini R., Lindner M., State of Russian forests and forestry, In: *Russian Forests and Climate Change. What Science Can Tell Us*, European Forest Institute, 2020, pp. 17–44.